

## 호기조에 고정상 담체를 충전한 A<sup>2</sup>/O공정에서 무산소조 체류시간 변화가 유기물질 및 질소 제거에 미치는 영향

황규대<sup>†</sup> · 한봉석

경희대학교

## A Study on the Effect of an HRT of Anoxic Reactors on Organic Matter and Nitrogen Removal in A<sup>2</sup>/O Processes with Bio Contact Media in Aerobic Tank

Gye-Dae Whang<sup>†</sup> · Bong-Seok Han

Department of Environmental Engineering, Kyung Hee University, Yongin, Korea  
(Received 8 December 2006, Accepted 31 May 2007)

### Abstract

Four parallel A<sup>2</sup>/O systems maintaining an MLSS of 3,000 mg/L were operated to investigate the effects of varying an HRT of anoxic reactors and packing Bio contact media (BCM, fixed beds) in aerobic reactors on organic matter removal and nitrification/denitrification efficiencies. All systems were operated under conditions that the external recycle ratio was kept 0.5 Q while the internal recycle ratio was changed 1.0 Q to 1.5 Q with that NH<sub>4</sub>-N concentration of feed was increased to 40 mg/L by adding NH<sub>4</sub>Cl. In terms of TSS and TCOD<sub>cr</sub> removal efficiency, both systems with BCM and a system without BCM, respectively, had a similar level of the removal efficiency under varied HRTs of anoxic reactors (0.6 hr, 1.3 hr, 2 hr, 2 hr; control, without BCM) showing that varying an HRT of anoxic reactors did not affect the removal efficiency. While SCOD<sub>cr</sub> removal efficiency of systems with BCM was improved approximately 4~5% at the same HRT of anoxic reactor, the removal efficiency of system with BCM was slightly decreased by reducing an HRT of anoxic reactor. The nitrification efficiency for both systems with BCM and a system without BCM was above 94% showing that packing BCM in aerobic reactors and varying an HRT of anoxic reactors did not affect the efficiency significantly despite of increasing NH<sub>4</sub>-N concentration of feed. The denitrification efficiency increased from 81.4% to 85.4% at system with BCM while the efficiency decreased when a shorter HRT of anoxic reactors was kept. The excellent effluent quality for NO<sub>3</sub>-N concentration was observed although the NO<sub>3</sub>-N concentration increased in anoxic reactors that NH<sub>4</sub>-N concentration of feed sufficiently converted into nitrate through nitrification. As a result, packing 20% BCM to an aerobic reactor with HRT of 1.3 hr of anoxic reactor in A<sup>2</sup>/O system can achieve a similar level of nitrogen removal efficiency in A<sup>2</sup>/O system which the aerobic reactor had no BCM and HRT of 2 hr for anoxic reactor is maintained.

**keywords** : Bio contact media (BCM), Denitrification, Nitrification

### 1. 서론

하·폐수처리시설의 방류수 기준이 강화되면서 질소제거를 위해 생물학적 처리공정을 활용한 효과적이고 경제적인 고도처리기술이 연구·개발되어 적용되고 있다.

부유성 미생물만을 이용한 생물학적 질소 제거공정은 부하 변동에 대응력이 약하고, 잉여오니 발생량이 많고, 슬러지 Bulking이 발생하여 유지관리가 어려워 담체를 이용한 생물막 공법에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다(윤 등, 2000; Morper, 1994). 생물막 공법은 반응조내에 증식속도와 성장률이 낮은 질산화 박테리아와 다양한 미생물이 고농도로 유지되도록 하여 충격부하에도 강하며 슬러지의

자산화가 촉진되어 슬러지 발생량을 줄일 수 있는 이점이 있다. 산업폐수를 처리하는 생물 반응조에 생물막 담체를 충전시켜 활성슬러지공정보다 유기물 제거율은 5배이상, 질산화율은 4배 이상 향상시켜 기존 활성슬러지 공정의 HRT를 30시간에서 6시간으로 낮출 수 있다는 연구보고가 있다(김 등, 1998). 또한 호기성 반응조에 충전시킨 담체표면에 형성된 생물막 내부로의 산소확산 한계에 의한 DO농도 구배에 의해 질산화 미생물과 탈질 미생물이 생물막 내부에 공존하여 질산화 반응과 탈질 반응이 동시에 진행되도록 유도하여, 부유미생물만을 이용한 공정보다도 높은 질소 제거효율을 보고한 연구들도 있다(민 등, 2004; 박 등 2000). 김 등(1997)은 생물막 담체의 형태별 탈질율을 비교 실험한 결과 HRT 6시간에서 유동상담체와 고정상담체의 탈질율이 활성슬러지공정의 탈질율에 비해 7~10배 높다는 연구 결과를 보고하였다. 또한 배(2006)는 고정생물막으로 섬유

<sup>†</sup> To whom correspondence should be addressed.  
gdwhang@khu.ac.kr

상 담체를 충전한 호기 반응조내에서 동시 질산화/탈질 반응이 일어나 부유성장 공정보다 높은 질소제거율을 얻을 수 있었다고 보고하였다. 따라서 A<sup>2</sup>/O공정의 호기 반응조에 담체를 충전하여 질산화와 탈질 반응이 동시에 일어나도록 유도할 경우 탈질을 위해 무산소조로 반응되는 내부 반응수의 질산성질소의 부하가 감소하여 무산소조의 수리학적 체류시간을 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 동일한 수리학적 체류시간에서는 질소 제거효율을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 호기조내에 섬유상 담체를 충전한 A<sup>2</sup>/O공정에서 담체충진여부와 무산소조의 수리학적 체류시간변화가 운전조건에 따라 유기물질과 질소 제거효율에 미치는 영향을 비교 평가하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 실험장치

본 연구를 위하여 Fig. 1과 같이 혐기조, 무산소조, 호기조와 침전지가 결합된 A<sup>2</sup>/O공정으로 구성된 총 4개의 시스템을 무색투명한 아크릴로 제작하여 운전하였다. 호기조에 고정상 담체를 반응조 용적대비 20%로 충전한 Sys.#2, #3, #4와 담체를 충전하지 않은 Sys.#1을 운전하여 담체충진에 따른 처리효율을 비교분석하였다. 각 시스템의 혐기조, 호기조의 용량은 각각 1.3 L, 4 L이고 무산소조의 용량은 Sys.#1, #2는 2.7 L로, Sys.#3, #4는 각각 1.8 L, 0.9 L로 하였다. 모든 반응조의 혐기조, 호기조의 수리학적 체류시간은 각각 1 hr, 3 hr로, 무산소조의 HRT는 Sys.#1, #2가 2 hr, Sys.#3, #4는 각각 1.3 hr, 0.6 hr로 유지되도록 유입

유량을 주입하였다. 혐기조와 무산소조 반응조내 미생물과 유입수 및 반송슬러지의 완전 혼합을 위해 반응조 상부에 교반기를 설치하였으며 호기조 하부에 교반과 산소공급을 위해 산기관을 설치하였다. 각 시스템의 유입수와 호기조에서 무산소조로의 내부반송, 침전조에서 혐기조로의 외부반송은 유량조절이 가능한 총 3대의 정량펌프를 이용하여 이루어졌으며 유입수 공급과 각 시스템의 유출수의 수집을 위해 100 L와 20 L 용량의 저류조를 이용하였다. 반응조에 투입된 식종 슬러지는 고도처리공정이 적용되고 있는 하수처리시설의 호기반응조에서 채취된 것을 이용하였으며 반응조의 MLSS농도를 약 3,000 mg/L로 조정하기 위해 각 반응조에 적당량을 투입하였다. 모든 호기반응조의 DO농도는 4~6 mg/L로 유지하였다. Fig. 1과 Table 1은 본 연구에 사용되어진 A<sup>2</sup>/O시스템의 구성도와 운전조건을 나타낸 것이다.

### 2.2. 운전방법

호기조에 고정상담체를 충전한 A<sup>2</sup>/O시스템에서 무산소조 체류시간의 변화에 따른 유기물질과 질소 제거율을 평가하기 위해 약 2주간 반응조내 미생물의 안정화기간을 두어 질산화율이 안정적으로 유지되기 시작한 후부터 약 120일간 운전하였다. 전체 운전기간동안 Mode1 운전 기간에는 외부반송율은 유입유량의 0.5 Q로 일정하게 유지한 상태에서 내부 반송율을 1 Q로 운전하였고, Mode2운전기간에는 내부반송율을 1.5 Q로 증가시켜 운전하였다. 이후 Mode3 운전기간에는 내부반송율을 1.5 Q로 유지하고 암모니아성 질소의 농도를 NH<sub>4</sub>Cl을 이용하여 약 40 mg/L로 증가시킨 유입수를 주입하여 System을 운전하였다. 이때 NaHCO<sub>3</sub>를

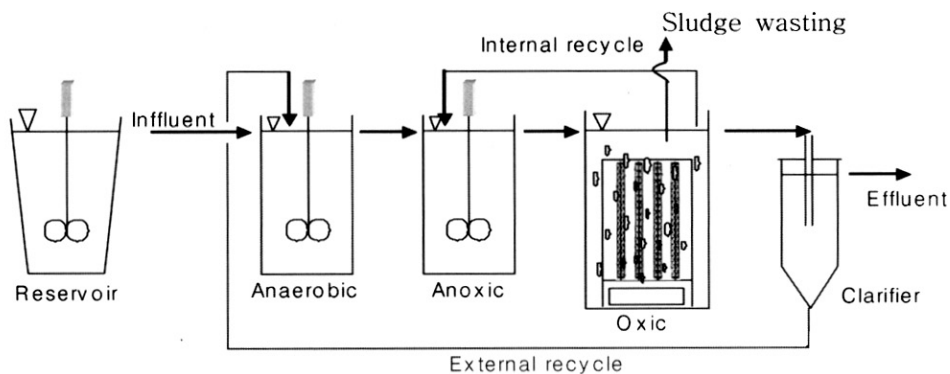


Fig. 1. Schematic diagram of Anaerobic-Anoxic-Oxic bioreactor.

Table 1. Operating condition of the A<sup>2</sup>/O systems

Reactor	Anaerobic		Anoxic		Aerobic			Total HRT	External recycle	Mode1	Mode2	Mode3
	HRT (hr)	Volume (L)	HRT (hr)	Volume (L)	HRT (hr)	Volume (L)	Packing ratio(%)					
Sys.#1			2	2.7			0	6				Internal recycle
Sys.#2	1	1.3	2	2.7	3	4		6	0.5 Q	Internal recycle	Internal recycle	1.5 Q
Sys.#3			1.3	1.8			20	5.3		1 Q	1.5 Q	Influent NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N
Sys.#4			0.6	0.9				4.6				40 mg/L

주입하여 유입수의 알카리도를 보충하였다. 운전기간동안 시스템의 MLSS농도는 SRT계산보다는 매일 측정된 MLSS농도값에 따라 적정 잉여 슬러지량을 각 시스템 호기조로부터 폐기하여 각 시스템의 MLSS농도가 약 3,000 mg/L내외로 유지되도록 하였다.

### 2.3. 담체 특성

본 실험에 사용된 담체는 BCMS로 명명된 섬유상 담체로 I사에서 개발한 polypropylene 재질의 Ringlace형이며, 현수여재의 링 고리의 수는 1 m당 약 20만개의 고리가 있으며 여재 1 m당 실의 총 길이는 86 km로서 미세한 실들의 360도 각도로 미생물이 부착가능하며, 단위 길이당 비표면적은 270 m<sup>2</sup>/m이다.

### 2.4. 분석방법

시료분석항목은 유기 물질과 질소제거율을 평가할 수 있는 TSS, TCOD<sub>cr</sub>, SCOD<sub>cr</sub>, TKN, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>2</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N을 대상으로 하였고, 용존성물질 분석은 0.45 μm membrane filter를 통과한 시료를 이용하였다. 분석 방법은 Standard Methods(1995)와 수질오염공정시험법에 명시된 방법을 이용하여 실시하였다.

### 2.5. 유입수 성상

본 연구에 사용된 유입수 시료는 오산시에 소재한 오산시 환경사업소내로 유입되는 하수를 1 mm screen을 통과한 것을 사용하였다. Table 2는 Mode별 운전기간 동안의 유입수 성상을 나타낸 것이다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 유기물질 제거특성

유입수의 TSS 평균농도는 Mode1에서 217 mg/L, Mode2, Mode3에서 각각 229 mg/L, 223 mg/L로 나타났다. TSS제거율은 Mode1 운전기간 Sys.#1에서는 88.5%, 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4의 TSS제거율은 90%이상 각각 91.1%, 90.8%, 90.0%으로 나타나 담체충진으로 인해 TSS제거율이 1.5~3.1% 더 높게 나타났다. Mode별 운전기간 담체를 충전하지 않은 Sys.#1보다 담체를 충전한 시스템에서 TSS제거율이 약간 높게 나타났는데 이는 호기 반응조내에 충전된 담체표면의 생물막에 입자상 유기물질이 포획되어 제거되었기 때문으로 사료된다. 또한 내부반송율을 1 Q에서

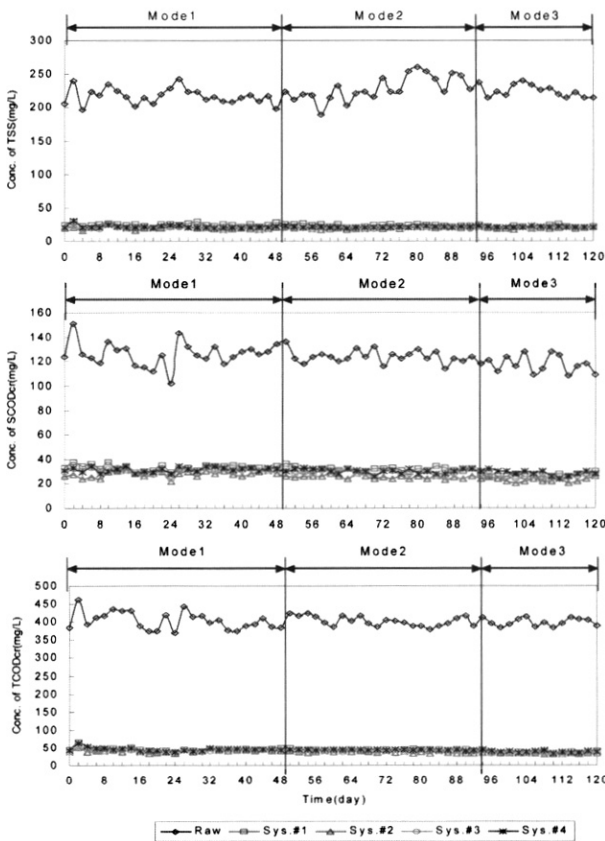
1.5 Q로 증가시킨 Mode2와 유입수 암모니아성 질소 농도를 증가시킨 Mode3 운전조건에서도 비슷한 TSS제거율을 나타내어 위와 같은 운전조건변화는 TSS제거율에 영향을 미치지 않는 것으로 관찰되었다. 또한 무산소조의 체류시간이 감소된 Sys.#2, #3, #4의 TSS제거율은 비슷한 값을 나타내어 무산소조 체류시간 변화가 TSS제거에 미치는 영향은 관찰되지 않았다. Mode별 운전기간 유입수의 평균 TCOD<sub>cr</sub>농도는 Mode1에서 404 mg/L, Mode2에서 403 mg/L, Mode3에서 398 mg/L로 나타났고, TCOD<sub>cr</sub>제거율은 Mode1 운전기간 모든 시스템에서 약 89.0~90.5%로 나타나 담체를 충전하지 않은 Sys.#1과 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4가 큰 차이를 나타내지 않았으며, 무산소조의 HRT감소는 TCOD<sub>cr</sub>제거율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. Mode2와 Mode3 운전기간동안 TCOD<sub>cr</sub>제거효율은 모든 시스템에서 비슷한 값을 나타냈다. 운전기간동안 유입수의 SCOD<sub>cr</sub>농도는 Mode1에서 127 mg/L, Mode2에서 125 mg/L, Mode3에서 118 mg/L를 나타내었으며, 각 시스템의 유출의 평균 SCOD<sub>cr</sub>농도는 Mode1에서 27.3~33.3 mg/L범위로, Mode2에서 25.3~31.3 mg/L범위로, Mode3에서 22.8~27.7 mg/L범위로 나타났다. SCOD<sub>cr</sub> 제거율은 담체를 충전하지 않은 Sys.#1보다 담체를 충전한 Sys.#2에서 약 5% 높게 나타났는데, 이는 담체의 충전으로 인해 호기 반응조의 미생물농도가 높게 유지되었고 담체표면의 생물막 내부의 DO농도 구배에 의한 탈질반응에 탄소원으로 SCOD<sub>cr</sub>이 소모되었기 때문으로 사료된다(Klangduen et al., 1999). 또한 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4의 SCOD<sub>cr</sub> 제거율은 무산소조의 체류시간이 감소함에 따라 감소하는 경향을 나타냈는데 이는 무산소조의 체류시간이 감소함에 따라 무산소조 단위 체적당 SCOD<sub>cr</sub>의 부하가 증가하여 무산소조에서 SCOD<sub>cr</sub>의 소모가 감소하였기 때문으로 사료된다. Sys.#3, #4는 무산소조의 HRT감소로 전체 시스템의 HRT가 감소하였으나 담체를 충전하지 않은 Sys.#1보다 SCOD<sub>cr</sub>제거율이 각각 2.3%, 1.5% 더 높게 나타났다. 운전 Mode에 따른 TSS와 TCOD<sub>cr</sub>의 제거효율 변화는 미미하였지만 SCOD<sub>cr</sub>의 제거효율은 내부반송율이 증가된 Mode2와 유입수의 암모니아성 질소농도가 증가된 Mode3의 운전조건에서 0.2~2.7% 높게 나타났는데, 이는 용존성 유기물질이 무산소조의 탈질 반응과 호기조 담체에 부착된 미생물의 동시 질산화/탈질 반응에 의해 많이 소모되었기 때문이라 사료된다(박 등, 2000). Fig. 2에는 운전기간 중 Mode별 각 시스템의 유입수와 유출수의 유기 물질 농도변화, Table 3에는 유

Table 2. Characteristics of influent wastewater

Phase	Influent Conc., mg/L (range)								
	pH	Alkalinity	TSS	TCOD <sub>cr</sub>	SCOD <sub>cr</sub>	TKN	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>2</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N
Mode1	7.2	193	217	404	127	25.9	22.9	0.04	0.2
	(6.7~7.4)	(166~244)	(197~242)	(369~462)	(102~151)	(23.8~29.9)	(20.8~26.4)	(0~0.07)	(0~0.5)
Mode2	7.3	198	229	403	125	27.1	24.2	0.03	0.3
	(6.8~7.5)	(174~262)	(189~260)	(378~425)	(114~132)	(25.0~28.9)	(22.4~26.4)	(0~0.06)	(0~0.4)
Mode3	7.6	264	223	398	118	43.7	39.7	0.06	0.3
	(7.1~7.9)	(242~305)	(214~240)	(384~414)	(108~128)	(37.4~46.5)	(32.4~41.8)	(0~0.10)	(0~0.5)

**Table 3.** Experimental results of organic matter removal with each system in varying Mode

Phase	Sys.	TSS (mg/L)			TCOD <sub>cr</sub> (mg/L)			SCOD <sub>cr</sub> (mg/L)		
		Influent	Effluent	Re (%)	Influent	Effluent	Re (%)	Influent	Effluent	Re (%)
Mode1	Sys.#1		24.9	88.5		46.5	89.0		33.3	73.7
	Sys.#2	217	19.4	91.1	404	40.4	90.5	127	27.5	78.3
	Sys.#3		19.9	90.8		41.9	90.2		30.4	76.0
	Sys.#4		21.8	90.0		45.7	89.2		31.4	75.2
Mode2	Sys.#1			23.7		89.7			43.6	89.2
	Sys.#2	229	19.1	91.6	403	37.1	90.8	125	25.3	79.8
	Sys.#3		19.8	91.4		40.6	89.9		29.0	76.8
	Sys.#4		21.4	90.7		43.6	89.2		30.2	75.8
Mode3	Sys.#1			21.5		90.4			36.5	90.8
	Sys.#2	223	18.8	91.6	398	32.2	91.9	118	22.8	80.6
	Sys.#3		19.8	91.2		34.2	91.4		25.7	78.1
	Sys.#4		21.1	90.6		38.0	90.5		28.5	75.8



**Fig. 2.** Variation of organic matter concentration of influent and effluent of each system in varying Mode.

입수와 유출수의 평균값과 제거율을 나타내었다.

### 3.2. 질소제거 특성

#### 3.2.1. Mode1 운전기간

Table 4에는 운전기간 동안 Mode별 각 시스템에서의 유입수와 유출수의 TKN, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N의 평균농도와 질산화율, 탈질율 및 T-N제거율을 나타내었고, Fig. 4에는 Mode별 운전기간 유입수와 각 시스템 유출수의 TKN, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N 농도변화를 나타내었다. Mode1 운전기간 중 유입수

의 TKN농도는 23.8~29.9 mg/L의 범위로 평균 TKN농도는 약 25.9 mg/L로 나타났고 C/N(TCOD<sub>cr</sub>/TKN)비가 15.6이었다. 포기조에 대한 TKN 용적 부하는 0.207 kgTKN/ m<sup>3</sup> \*day로 나타났다. 유입수의 NH<sub>4</sub>-N의 평균 NH<sub>4</sub>-N 농도는 약 22.9 mg/L로 나타나 포기조에 대한 NH<sub>4</sub>-N의 용적 부하는 0.183 kgNH<sub>4</sub>-N/m<sup>3</sup>\*day로 나타났다.

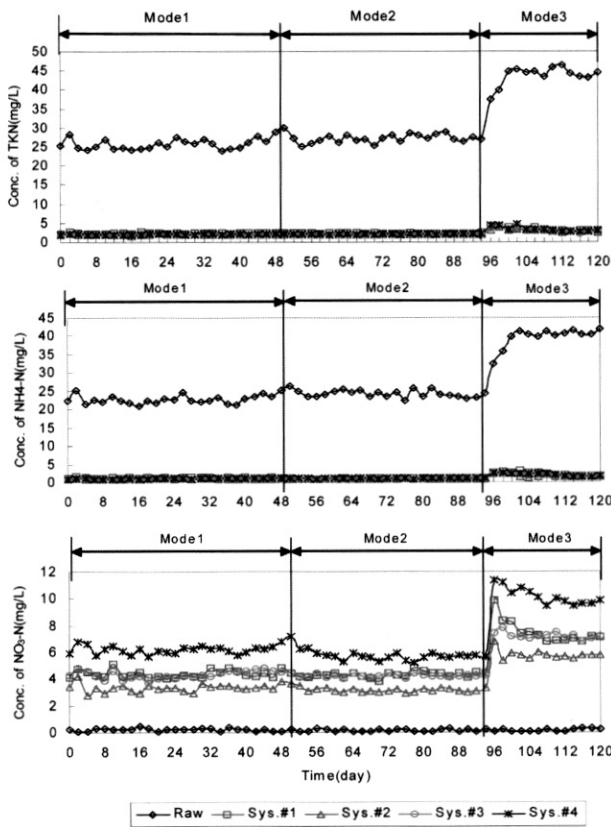
담체를 충전하지 않은 Sys.#1의 유출수 평균 TKN 농도는 2.40 mg/L로 나타났으며 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4의 유출수 평균 TKN 농도는 각각 1.96, 2.06, 2.06 mg/L로 나타났다. 또한 담체를 충전하지 않은 Sys.#1의 유출수 평균 NH<sub>4</sub>-N 농도는 1.31 mg/L로 나타났으며 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4의 유출수 평균 NH<sub>4</sub>-N 농도는 각각 0.98, 1.03, 1.04 mg/L로 나타났다. 담체를 충전하지 않은 Sys.#1의 유출수 평균 NO<sub>3</sub>-N 농도는 4.4 mg/L로 나타났고 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4의 유출수 평균 NO<sub>3</sub>-N 농도는 각각 3.3, 4.3, 6.2 mg/L로 나타났으며 모든 시스템의 유출수 NO<sub>2</sub>-N농도는 0.5 mg/L이하로 나타났다.

반응조 내에서 제거된 암모니아성 질소의 대부분이 세포 동화작용이 아닌 질산성 질소로 전환된다고 가정하고 유입수 TKN농도와 유출수 NH<sub>4</sub>-N농도를 이용하여 질산화율을 계산하면 담체를 충전하지 않은 Sys.#1의 질산화율은 94.9%로 나타났으며 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4의 질산화율은 각각 96.2%, 96.0%, 96.0%로 나타나 포기조에 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4의 질산화율이 담체를 충전하지 않은 Sys.#1의 질산화율보다 1.1~1.3% 더 높은 것으로 나타났다. 이는 운전기간 포기조의 DO 농도가 4~6 mg/L로 높게 유지되었으며, fibrous carrier나(Groenestijn et al., 1996), 천연 제올라이트가 함유된 페타이어담체(민 등, 2004)를 포기조에 충전하여 운전한 결과 97%이상의 질산화를 유도할 수 있었다는 연구결과와 같이 담체 충전으로 성장속도가 느린 질산화 미생물을 고농도로 유지할 수 있었기 때문에 사료된다.

유입수 TKN농도와 유출수 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N의 농도를 이용하여 탈질율을 계산하면 담체를 충전하지 않은 Sys.#1의 탈질율은 81.4%로 나타났으며 담체를 충전한

**Table 4.** Experimental results of nitrification and denitrification, T-N removal with each system in varying Mode

Phase	Sys.	TKN (mg/L)		NH <sub>4</sub> -N (mg/L)		NO <sub>3</sub> -N (mg/L)		Nitrification rate(%)	Denitrification rate(%)	T-N removal (%)
		influent	effluent	influent	effluent	influent	effluent			
Mode1	Sys.#1		2.40		1.31		4.4	94.9	81.4	73.6
	Sys.#2	25.9	1.96	22.9	0.98	0.21	3.3	96.2	85.4	79.2
	Sys.#3		2.06		1.03		4.3	96.0	81.3	75.0
	Sys.#4		2.06		1.04		6.2	96.0	73.9	67.8
Mode2	Sys.#1		2.36		1.01		4.3	96.2	82.2	74.3
	Sys.#2	27.1	1.95	24.2	0.93	0.15	3.1	96.5	86.6	79.8
	Sys.#3		2.02		1.02		4.2	96.1	82.4	75.7
	Sys.#4		2.08		1.09		5.7	95.9	76.3	69.5
Mode3	Sys.#1		3.38		2.21		7.5	95.0	81.3	71.3
	Sys.#2	43.7	2.95	39.7	1.65	0.16	5.8	96.2	85.3	79.1
	Sys.#3		3.15		1.98		7.2	95.5	81.9	72.5
	Sys.#4		3.40		2.02		10.2	95.4	74.6	66.6



**Fig. 3.** Variation of TKN, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N concentration of influent and effluent of each system in varying Mode.

Sys.#2, #3, #4의 탈질율은 각각 85.4%, 81.3%, 73.9%로 나타나 포기조에 담체를 충전하고 무산소조의 HRT를 Sys.#1과 동일하게 2 hr로 유지한 Sys.#2의 탈질율이 담체를 충전하지 않은 Sys.#1의 탈질율보다 높게 나타났는데 이는 A<sup>2</sup>O공정의 포기조에 고정생물막으로 섬유상 담체를 충전한 윤 등(2000)과 세라믹 담체를 충전한 이 등(2002)의 연구결과와 같이 충전된 담체표면의 생물막 내부에서 DO 농도 구배에 따른 탈질반응이 일어났기 때문으로 사료된다. 또한 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4의 탈질율은 무산소조의

체류시간이 감소함에 따라 감소하였으며 담체를 충전하지 않고 무산소조 체류시간이 2 hr인 Sys.#1과 담체를 충전하고 무산소조 체류시간을 1.3 hr로 감소시킨 Sys.#3의 탈질율이 비슷하게 나타났다.

A<sup>2</sup>O시스템에서 탈질반응에 의한 질산성 질소의 제거는 무산소조에서만 일어난다고 가정하고, 또한 세포합성에 의한 질소의 제거는 고려하지 않고, 유입수 TKN농도와 유출수 NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, NO<sub>2</sub>-N의 농도 차이와 무산소조의 MLSS농도, 무산소조 체류시간을 이용하여 각 시스템의 운전조건에 따른 무산소조에서의 비탈질율(SDNR: Specific Denitrification rate)을 산출하였다. 담체를 충전하지 않은 Sys.#1에서 제거된 NO<sub>3</sub>-N농도는 20.0 mg/L로 나타났고 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4에서 제거된 NO<sub>3</sub>-N 농도는 각각 21.3 mg/L, 20.2 mg/L, 18.3 mg/L로 나타나 담체를 충전하지 않은 Sys.#1 무산소조의 비탈질율은 0.103 kgNO<sub>3</sub>-N/kg MLVSS\*day로 나타났으며 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4의 비탈질율은 각각 0.106 kgNO<sub>3</sub>-N/kg MLVSS\*day, 0.161 kgNO<sub>3</sub>-N /kgMLVSS\*day, 0.316 kgNO<sub>3</sub>-N/kg MLVSS\*day로 나타났다. 담체를 충전한 Sys.#2와 무산소조의 HRT를 감소시킨 Sys.#3, #4의 비탈질율이 높게 나타난 것은 무산소조의 HRT 감소로 미생물량이 작아지고, 부유성장 공정과 담체를 충전한 공정에서의 질산성 질소의 제거율을 비교한 민 등(2004)의 연구결과와 같이 NO<sub>3</sub>-N의 제거가 무산소조 뿐만 아니라 담체의 충전으로 인해 포기조에서도 일어났기 때문이라 사료된다.

유입수의 평균 T-N농도는 26.1 mg/L로 나타났으며 담체를 충전하지 않은 Sys.#1의 유출수 T-N의 평균 농도는 6.88 mg/L로 평균 73.6%의 T-N제거율을 나타냈고 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4의 유출수 T-N의 평균 농도는 각각 5.44 mg/L, 6.53 mg/L, 8.41 mg/L로 평균 79.2%, 75.0%, 67.8%의 T-N제거율을 나타냈다. T-N제거율은 담체를 충전하지 않은 Sys.#1보다 담체를 충전한 Sys.#2가 높게 나타났으며 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4는 무산소 체류시간이 2hr에서 1.3 hr, 0.6 hr로 감소함에 따라 T-N제거율도 감소하는 것으로 나타났다.

### 3.2.2. Mode2운전기간

내부반송율을 1 Q에서 1.5 Q로 증가시켜 운전한 Mode2 기간 유입수의 C/N비는 14.9로 포기조에 대한 TKN의 용적부하는  $0.217 \text{ kgTKN/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 나타났으며 질산화율은 시스템 번호에 따라 96.2%, 96.5%, 96.1%, 95.9%로 모든 시스템에서 95%이상의 질산화율을 나타냈다. 또한 Mode1과 Mode2운전기간 C/N비는 비교적 높은 값을 나타내고 있지만, 질산화율은 두 운전기간 94%이상의 높은 질산화율을 나타냈는데 이는 TKN농도가 낮게 유입되어 C/N비가 19.1인 하수에서 99%의 TKN제거율을 나타냈다고 보고한 Jank 등(1977)의 연구결과와 같이 본 연구에서도 TKN농도가 비교적 낮은 유입수가 유입되어 나타난 결과라 사료된다. 탈질율은 시스템 번호에 따라 82.2%, 86.6%, 82.4%, 76.3%로 나타나 담체를 충전한 시스템의 탈질율이 높게 나타났고, 담체를 충전하지 않고 무산소조 HRT를 2 hr로 운전한 Sys.#1과 담체를 충전하고 무산소조 HRT를 1.3 hr로 감소하여 운전한 Sys.#3의 탈질율이 비슷하게 나타났다. 또한 내부반송율을 1 Q에서 1.5Q로 증가시켜 운전한 Baeza 등(2004)의 연구결과와 같이 무산소조로 반송되는 반송수 내의  $\text{NO}_3\text{-N}$ 이 증가하여 탈질반응에 의한  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 제거가 증가할 것으로 예상하였으나 질소제거율은 향상되지 않는 것으로 나타났다. 이는 내부반송을 증가폭이 그리 높지 않고 탈질 반응에 필요한 유기물이 충분히 공급되지 못 하였기 때문으로 사료된다. 무산소조의 HRT가 감소함에 따라 탈질율도 감소하는 것으로 나타났다.

각 시스템에서 세포합성에 의해 소비된 유기물과 질소의 양을 무시하고 유입되는 유기물은 탈질 과정에서만 제거된다고 가정하고 유입수의  $\text{TCOD}_{\text{cr}}$ 과 유출수의  $\text{SCOD}_{\text{cr}}$ 의 차이와 제거된  $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도로 산출한  $1 \text{ mgNO}_3\text{-N}$ 이 제거 되는데 소모된 유기물의 양은 각 시스템 번호에 따라  $17.8 \text{ mgTCOD}_{\text{cr}}/\text{mgNO}_3\text{-N}_{\text{removed}}$ ,  $17.1 \text{ mgTCOD}_{\text{cr}}/\text{mgNO}_3\text{-N}_{\text{removed}}$ ,  $17.9 \text{ mgTCOD}_{\text{cr}}/\text{mgNO}_3\text{-N}_{\text{removed}}$ ,  $19.3 \text{ mgTCOD}_{\text{cr}}/\text{mgNO}_3\text{-N}_{\text{removed}}$ 로 나타났다. 이는 Randall 등(1990)의 연구결과에서  $\text{TCOD}_{\text{cr}}$ , TSS, TKN의 농도가 각각  $229 \text{ mg/L}$ ,  $112 \text{ mg/L}$ ,  $27.3 \text{ mg/L}$ 인 도시하수를 HRT가 6 hr로 유지된  $\text{A}^2/\text{O}$ 공정에 투입하여 얻은 단위  $\text{mgNO}_3\text{-N}$  당 소비되는 COD양  $8.95 \text{ mgTCOD}_{\text{cr}}/\text{mgNO}_3\text{-N}_{\text{removed}}$ 보다 높은 값으로, 본 연구에서 사용한 하수에는 유기물의 양은 많지만 용존성 유기물보다 입자상 유기물질이 많은 부분을 차지하고 용존성 유기물질도 탈질 반응에 사용되지 못하고 호기조에서 산화되었기 때문으로 판단된다.

내부반송율을 1 Q에서 1.5 Q로 증가시켜 운전한 Mode2기간은 Mode1운전기간과 비교하여 담체를 충전한 시스템에서  $\text{NO}_3\text{-N}$  제거량은 비슷하였고, 비탈질율도 시스템 번호에 따라 각각  $0.106 \text{ kgNO}_3\text{-N}/\text{kgMLVSS} \cdot \text{day}$ ,  $0.111 \text{ kgNO}_3\text{-N}/\text{kgMLVSS} \cdot \text{day}$ ,  $0.165 \text{ kgNO}_3\text{-N}/\text{kgMLVSS} \cdot \text{day}$ ,  $0.336 \text{ kgNO}_3\text{-N}/\text{kgMLVSS} \cdot \text{day}$ 로 비슷하였다. 또한 T-N제거율은 시스템 번호에 따라 74.3%, 79.8%, 75.7%, 69.5%로 나타나 Mode1과 비교하여 거의 비슷한 결과를 나타내었고, 무산소조 HRT감소에 따른 질소제거율은 감소하는 것으로 나타났다.

### 3.2.3. Mode3운전기간

유입수의 유기물질 농도는 Mode1과 Mode2운전기간과 거의 비슷한 상태에서  $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도를 약  $40 \text{ mg/L}$ 로 증가시켜 운전한 Mode3운전기간 유입수의 TKN농도는  $37.4\sim 46.5 \text{ mg/L}$ 로 평균 농도는  $43.7 \text{ mg/L}$ 로 나타났고, C/N비는 9.1로 Mode1, 2보다 낮게 나타났다. 포기조에 대한 TKN용적부하는  $0.350 \text{ kgTKN/m}^3 \cdot \text{day}$ 로 나타났다. 유입수 평균  $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도는  $39.7 \text{ mg/L}$ 로 나타나 포기조에 대한  $\text{NH}_4\text{-N}$ 용적부하는  $0.318 \text{ kgNH}_4\text{-N}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 로 나타났다. Mode3운전기간 질산화율은 시스템 번호에 따라 95.0%, 96.2%, 95.5%, 95.4%로 나타나 유입수의 암모니아성 질소 농도가 증가하여도 모든 시스템에서 95%이상의 질산화율을 나타냈는데, 이는 호기조에 대한 암모니아 부하가 각 Mode별로  $0.183 \text{ kgNH}_4\text{-N}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ ,  $0.194 \text{ kgNH}_4\text{-N}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ ,  $0.318 \text{ kgNH}_4\text{-N}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 로 나타나 이 범위내의 암모니아 부하에서는 질산화에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 사료된다. 이 등(2003)의 연구에서도 무산소조단-호기조2단으로 구성된 시스템에서 총 HRT를 6hr로 운전한 경우 암모니아 부하가  $1.0 \text{ kgNH}_4\text{-N}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$ 일 때 암모니아성 질소 제거효율이 96%로 나타나 암모니아 부하가  $1.0 \text{ kgNH}_4\text{-N}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$  이하에서는 질산화에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 사료된다. Mode3운전기간 암모니아성 질소농도의 증가에 따른 탈질율은 시스템 번호에 따라 각각 81.3%, 85.3%, 81.9%, 74.6%를 나타내 모든 시스템에서 Mode2운전기간의 각 시스템과 비슷한 탈질율을 나타냈다. 하지만 Mode3운전기간 동안 시스템 번호에 따라 제거된  $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도는 각각  $33.7 \text{ mg/L}$ ,  $35.9 \text{ mg/L}$ ,  $34.2 \text{ mg/L}$ ,  $31.1 \text{ mg/L}$ 로 나타나 Mode2와 비교하면 모든 시스템에서 각각 약  $13 \text{ mg/L}$ 가 더 제거된 것으로 나타났고, 시스템 번호에 따라 비탈질율은 각각  $0.168 \text{ kgNO}_3\text{-N}/\text{kgMLVSS} \cdot \text{day}$ ,  $0.179 \text{ kgNO}_3\text{-N}/\text{kgMLVSS} \cdot \text{day}$ ,  $0.264 \text{ kgNO}_3\text{-N}/\text{kgMLVSS} \cdot \text{day}$ ,  $0.514 \text{ kgNO}_3\text{-N}/\text{kgMLVSS} \cdot \text{day}$ 로 나타났다.

$1 \text{ mgNO}_3\text{-N}$ 제거에 소모된 유기물량은 시스템 번호에 따라 각각  $11.0 \text{ mgTCOD}_{\text{cr}}/\text{mgNO}_3\text{-N}_{\text{removed}}$ ,  $10.4 \text{ mgTCOD}_{\text{cr}}/\text{mgNO}_3\text{-N}_{\text{removed}}$ ,  $10.9 \text{ mgTCOD}_{\text{cr}}/\text{mgNO}_3\text{-N}_{\text{removed}}$ ,  $11.9 \text{ mgTCOD}_{\text{cr}}/\text{mgNO}_3\text{-N}_{\text{removed}}$ 로 나타나 Mode1, 2운전기간보다 탈질 반응에 유기물질이 더 적게 사용된 것으로 나타났다. 이는 적용된 운전조건에서 무산소조내에서 탈질 반응이 증가되고 이에 따라 유기물이 호기반응조에서보다 무산소조에서 소비되었기 때문으로 사료된다.

Mode3운전 기간 유입수의 T-N농도는  $37.6\sim 46.6 \text{ mg/L}$ 로 평균  $43.9 \text{ mg/L}$ 로 나타났고, 이때 시스템 번호에 따라 T-N 제거율은 각각 71.3%, 79.1%, 72.5%, 66.6%로 나타나 Mode2보다 질소제거율이 0.6~3.2%낮게 나타났지만 제거된  $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 증가하여 유입수의 암모니아성 질소 농도가 증가하여도 안정적인 질소제거효율을 나타내었다.

운전조건에 따른 Sys.#1과 Sys.#3의 운전결과 HRT가 3 hr인 포기조에 섬유상 담체를 반응조 용적대비 20%로 충전한  $\text{A}^2/\text{O}$ 시스템의 무산소조 HRT를 2 hr에서 1.3 hr로 단축하여도 담체를 충전하지 않은  $\text{A}^2/\text{O}$ 시스템과 유사한 질소

제거효율을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론

호기조에 섬유상 담체를 충전한 A<sup>2</sup>O공정에서 담체충진여부와 무산소조의 수리학적 체류시간이 운전조건에 따라 유기물질과 질소 제거효율에 미치는 영향을 평가한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) TSS 및 TCOD<sub>cr</sub> 제거율은 Mode별 운전기간동안 담체를 충전하지 않은 Sys.#1과 담체를 충전한 Sys.#2, #3, #4에서 비슷한 제거율을 나타내어 담체 충전과 내부반송율 증가, 유입수 암모니아 농도 증가에 따른 영향은 거의 관찰되지 않았으며, 무산소조 체류시간 감소에 따른 변화도 미미하였다. SCOD<sub>cr</sub> 제거율은 Mode 1, 2, 3 운전기간동안 담체충진으로 약 4~5% 향상되는데, 이는 SCOD<sub>cr</sub>이 담체의 충전으로 인해 담체 표면의 생물막 내부의 DO농도 구배에 의한 탈질반응에 기질로 사용되었기 때문으로 사료된다.
- 2) 질산화율은 Mode1운전기간동안 모든 시스템에서 거의 비슷한 결과값을 나타내어 담체 충전과 무산소조 체류시간 변화에 따른 영향은 미미하였다. 또한 내부반송율을 1 Q에서 1.5 Q로 증가시킨 Mode2와 유입수 암모니아 농도를 40 mg/L로 증가시켜 운전한 Mode3운전기간동안 질산화율에 대한 영향은 거의 관찰되지 않았다.
- 3) 탈질율은 Mode1운전기간동안 담체 충전으로 약 4% 향상되었고, 무산소조 체류시간이 줄어들면서 감소하였다. Mode2운전기간 내부반송율을 1 Q에서 1.5 Q로 증가시켜 탈질을 향상을 기대하였지만, 내부반송율 증가폭이 그리 높지 않았고, 탈질 반응을 위한 유기물 공급이 충분하지 않아 Mode1과 비슷한 결과를 나타내었다. Mode3 운전기간 모든 시스템에서 탈질율은 Mode1, 2와 비슷한 결과를 나타내었으나 Mode2운전기간보다 약 13 mg/L의 NO<sub>3</sub>-N이 더 제거되어 암모니아성 질소의 농도가 40 mg/L로 증가하여도 양호한 질소제거효율을 나타내었다.
- 4) Mode별 운전기간 담체를 충전하지 않고 무산소조 체류시간이 2 hr인 Sys.#1과 담체를 충전하고 무산소조 체류시간이 1.3 hr인 Sys.#3의 질소제거율이 유사하게 나타나 호기조에 섬유상 담체를 반응조 용적 대비 20%로 충전할 경우 A<sup>2</sup>O시스템 무산소조의 체류시간을 2 hr에서 1.3 hr로 단축하여도 비슷한 질소제거효율을 얻을 수 있는 것으로 나타났다.

#### 참고문헌

- 김용환, 조재현, 김무훈, 이용우, 생물막 담체를 이용한 질산화 반응 특성 연구, *대한환경공학회지*, **19**(3), pp. 415-424 (1997).
- 김용환, 조재현, 이용우, 정용대, 이원권, 생물막 담체를 이용한 고농도 암모니아성 질소 함유 산업폐수의 유기물 제거 및 질산화 반응 연구, *수질보전학회지*, **14**(1), pp. 87-97 (1998).
- 민경석, 임광희, 정용준, 천연 제올라이트가 함유된 유동상 페타이어담체의 질소 제거 효율 향상, *대한환경공학회지*, **26**(7), pp. 804-809 (2004).
- 박태진, 이정민, 송경석, 조일형, 김영규, 정문호, A<sup>2</sup>O공정에서의 섬유상 담체 사용 유무에 따른 하수의 질소·인 제거에 관한 연구, *한국환경위생학회지*, **26**(3), pp. 69-75 (2000).
- 배성현, 고정생물막을 이용한 A<sup>2</sup>O공정에서 무산소조 체류시간 변화가 유기물질 질소 및 인 제거에 미치는 영향, *경희대학교 석사학위논문* (2006).
- 윤조희, 박승환, 이상훈, 김승현, 물질수지를 이용한 A<sup>2</sup>O 고정생물막법에서의 호기탈질평가, *대한환경공학회지*, **22**(2), pp. 231-239 (2000).
- 이태경, 박재구, 한기봉, 세라믹 담체를 이용한 고정생물막 공정에서의 동시 질산화 및 탈질화, *대한환경공학회지*, **24**(6), pp. 1105-1115 (2002).
- 이해일, 임정훈, 고주형, 김창원 생물막 반응기를 이용한 고농도 유기성 폐수의 질산화와 탈질, *대한환경공학회지*, **25**(4), pp. 517-522 (2003).
- Baeza, J. A., Gabriel, D., and Lafuente, J., Effect of Internal Recycle on the Nitrogen Removal Efficiency of an Anaerobic/Anoxic/Oxic (A<sup>2</sup>O) Wastewater Treatment Plant (WWTP), *Process Biochemistry*, **39**, pp. 1615-1624 (2004).
- Jank, B. E., Sutton, P. M., Wilson, R. W. and Murphy, K. L., Nitrogen control : Design Considerations for Supported Growth Systems, *J. Water Pollut. Control Fed.*, **49**(4), pp. 549-557 (1977).
- Klangduen, P. and Jurg, K., Study of Factors Affecting Simultaneous Nitrification and Denitrification(SND), *Wat. Sci. Tech.*, **39**(6), pp. 61-68 (1999).
- Morper, M. R., Upgrading of Activated Sludge Systems for Nitrogen Removal by Application of the LINPOR-CN Process, *Wat. Sci. Tech.*, **29**(12), pp. 167-176 (1994).
- Randall, C. W., Waltrip, D. and Wable, M. V., Upgrading a Municipal Activated Sludge Plant for High-rate Biological Nutrient Removal, *Wat. Sci. Tech.*, **22**(7/8), pp. 21-33 (1990).
- van Groenestijn, J. W., Liu, J. X., Doddema, H. J. and Wang, B. Z., Removal of Nitrogen and Phosphorus Using a New Biofilm-Activated-Sludge System, *Wat. Sci. Tech.*, **34**(1-2), pp. 315-322 (1996).